



УДК 662.95:502:519.22

В.Д. Катин, д-р техн. наук (Дальневосточный государственный университет путей сообщения; Тихоокеанский государственный университет), г. Хабаровск, Россия). E-mail: katinvd@mail.ru;
В.Ю. Косыгин, д-р геолого-минер. наук («Вычислительный центр» Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск). E-mail: kosyginv@inbox.ru

Математическое планирование экспериментальных исследований экологичности газовых горелок нефтезаводских печей и модернизация их конструкций

В настоящее время все более актуально обеспечение экологической безопасности различных производств, включая нефтеперерабатывающие. На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) России эксплуатируется более 1500 технологических трубчатых печей, в составе которых работают десятки тысяч горелочных устройств (ГУ), являющихся основными источниками загрязнения окружающей среды (прежде всего воздушного бассейна) [1, 2]. Задача снижения вредных выбросов в атмосферу с продуктами сгорания связана с модернизацией и разработкой новых малотоксичных ГУ, обеспечивающих минимальные выбросы загрязняющих веществ — прежде всего оксидов азота (NO_x) и оксида углерода (СО).

По данным [2, 3] на НПЗ России эксплуатируются ГУ трех типов: горелки диффузионного принципа сжигания топлива (горелки типа ГП); инжекционные (кинетические) горелки с полным предварительным смешением топлива и воздуха (горелки типов ГИК, ГЭВК, ГГМ); многосопловые плоскофакельные горелки (типа ФП), работающие по смешанному (диффузионно-кинетическому) принципу горения.

При этом по данным обследования парка ГУ Ачинского, Киришского и Хабаровского НПЗ около 75...80 % всех горелок приходится на диффузионные горелки, а около 20...25 % — на ГУ кинетического и диффузионно-кинетического принципов горения [2].

Методика исследований

Цель данной работы — исследование влияния режимных параметров топочного процесса на образование оксидов азота и оксида углерода при сжигании газа в ГУ различных типов. Это возможно с применением математического планирования эксперимента [4] — одного из так называемых активных экспериментов. В данном случае (в отличие от пассивных экспериментов, где исследователь не вмешивается в технологический процесс, а просто регистрирует параметры процесса) исследователь действует по плану и активно управляет процессом. Это позволяет существенно уменьшить число опытов и одновре-

менно варьировать управляемые факторы по определенным правилам, а также значительно повысить точность и надежность результатов эксперимента.

В качестве целевых функций приняты концентрации оксидов азота и оксида углерода в выбросах из различных горелок, а в качестве управляемых факторов, оказывающих существенное влияние на эти целевые функции, — температура в зоне горения t , температура подаваемого на горение воздуха t_B , коэффициент избытка воздуха α . Интервалы варьирования: $t = 1550...1750$ °С, $t_B = 20...200$ °С, $\alpha = 1,05...1,15$.

Меняя значения этих факторов в определенном порядке и регистрируя изменение целевой функции, можно, применяя аппарат регрессионного анализа, определить конкретный аналитический вид целевой функции. При этом целесообразно перейти от размерных факторов t , t_B , α к соответствующим безразмерным факторам x_1 , x_2 , x_3 по формулам:

$$x_1 = \left(1 - 2 \frac{t^{\max} - t}{t^{\max} - t^{\min}}\right); \quad x_2 = \left(1 - 2 \frac{t_B^{\max} - t_B}{t_B^{\max} - t_B^{\min}}\right); \quad (1)$$

$$x_3 = \left(1 - 2 \frac{\alpha^{\max} - \alpha}{\alpha^{\max} - \alpha^{\min}}\right),$$

где $t^{\max} = 1750$ °С; $t^{\min} = 1550$ °С; $t_B^{\max} = 200$ °С; $t_B^{\min} = 20$ °С; $\alpha^{\max} = 1,15$; $\alpha^{\min} = 1,05$.

Известно, что механизмы образования NO_x и СО различны: NO_x образуется при высоких температурах в топке и избыточных концентрациях свободного кислорода и азота; СО образуется при низких температурах в зоне горения, неударообразительном смесеобразовании и недостаточном количестве окислителя. Однако, поскольку трубчатые печи являются единственным источником выбросов оксида углерода и оксидов азота, была принята общая схема эксперимента.

При планировании экспериментальных исследований были построены математические модели вредных выбросов в виде полиномиальных уравнений, коэффициенты в которых оценивались по результатам эксперимента.

Эксперименты проведены с использованием матриц планирования эксперимента, предложенных в работе [4]. По результатам экспериментов были определены численные значения коэффициентов уравнений регрессии для каждого типа горелок: диффузионной (ГП-1), кинетической (ГИК-2) и диффузионно-кинетической (ФП-2), по каждому исследованному вредному веществу.

Опуская промежуточные расчеты, проведенные авторами в математическом пакете Mathcad-15 с использованием математического аппарата планирования эксперимента [4], приведем модели выхода оксидов азота (Y_1) и оксида углерода (Y_2), полученные в виде уравнений регрессии:

для кинетических горелок типа ГИК-2

$$Y_1 = 0,225 + 0,015x_1 + 0,005x_3, \quad (2)$$

$$Y_2 = 0,016 - 0,003x_1 - 0,004x_3; \quad (3)$$

для диффузионно-кинетических горелок типа ФП-2

$$Y_1 = 0,215 + 0,009x_1 + 0,004x_3, \quad (4)$$

$$Y_2 = 0,045 - 0,003x_1 - 0,007x_3 + 0,001x_1x_3; \quad (5)$$

для диффузионных горелок типа ГП-1

$$Y_1 = 0,21 + 0,008x_1 + 0,031x_2 - 0,005x_3 + 0,002x_1x_2 + 0,001x_2x_3, \quad (6)$$

$$Y_2 = 0,075 - 0,005x_1 - 0,006x_2 - 0,008x_3 - 0,002x_2x_3. \quad (7)$$

Полученные регрессионные модели вредных выбросов записаны в кодированных переменных: в этом случае на коэффициенты регрессии не влияют масштаб и природа управляемых факторов, и можно по величине коэффициентов регрессии оценить степень влияния того или иного фактора на выбросы вредных веществ. Чем больше абсолютная величина соответствующего коэффициента регрессии, тем больше этот фактор влияет на отклик (изучаемый параметр выхода).

Значимость коэффициентов в уравнениях регрессии оценили по критерию Стьюдента, и слабые, содержащие в качестве сомножителей незначимые коэффициенты, были удалены из уравнений регрессии. Проверку адекватности уравнений регрессии, т. е. проверку правильности выбора линейной полиномиальной модели, проводили по критерию Фишера [5]. По критерию Кохрена проверяли воспроизводимость эксперимента, а также оценивали дисперсию шума и определяли дисперсию оценок коэффициентов регрессии. В результате проверок уравнений регрессии было подтверждено, что полученные регрессионные модели выбросов оксидов азота и оксида углерода являются адекватными, коэффициенты регрессии — значимыми, оценки дисперсий в опытах — однородны, и среди результатов опытов нет грубых ошибок при проведении экспериментов.

Проверка показала удовлетворительное совпадение расчетных характеристик, полученных с применением моделей, и экспериментальных данных.

Анализ результатов исследований

Из приведенных уравнений регрессии очевидно, что все факторы значимы, при этом существенными оказались и некоторые парные взаимодействия факторов. Анализируя влияние отдельных факторов на входные параметры, можно отметить, что с повышением температуры подогрева воздуха заметно увеличивается выход NO_x . С увеличением коэффициента избытка воздуха снижается концентрация CO . В исследованной области с наименьшим выбросом оксидов азота работают диффузионные горелки ГП-1 (без подогрева воздуха). В то же время кинетические ГУ типа ГИК-2 отличаются повышенными концентрациями оксидов азота, что объясняется максимальным температурным уровнем в зоне горения. Данное обстоятельство отражает физико-химические процессы образования оксидов азота, происходящие при горении топлива, и согласуется с тепловым (термическим) механизмом, предложенным академиком Я.Б. Зельдовичем [6].

Полученные математические модели позволяют, не проводя дополнительных опытов, аналитически рассчитать концентрации NO_x и CO при различных сочетаниях режимных факторов топочного процесса (в интервале варьирования). Следовательно, уравнения регрессии (2)–(7) можно рассматривать как инструмент исследования и анализа экологичности работы ГУ, позволяющий решать следующие важные задачи.

1. Качественное исследование влияния параметров ведения топочного режима на выход оксидов азота и оксида углерода. Например, в уравнении (6) на величину выхода NO_x большое влияние оказывает температура воздуха, подаваемого на горение t_B (безразмерный фактор x_2), и слабое — коэффициент избытка воздуха α (безразмерный фактор x_3), а также их парные взаимодействия. В связи с этим необходимо уменьшать температуру подаваемого воздуха организацией холодного дутья, что рекомендовано в работе [7]. В то же время при изучении выхода CO согласно уравнению (7) можно отметить слабое влияние на этот процесс как факторов x_1 , x_2 , x_3 , так и их парного взаимодействия x_2x_3 .

2. Проверка экологических требований, предъявляемых к горелкам трубчатых печей, в заданном диапазоне изменения режимных факторов с применением полученных математических моделей.

3. Сопоставление экологичности работы различных типов ГУ нефтезаводских печей.

Полученные математические модели экологических характеристик ГУ можно практически использовать с целью подбора малотоксичных горелок из числа ГУ, действующих на НПЗ. Так, из числа обследованных газовых горелок наиболее экологически эффективными являются диффузионные ГУ

конструкции ГП, работающие на холодном дутье без подогрева подаваемого воздуха.

Результаты, полученные авторами, хорошо согласуются с данными работ [2, 3, 7].

При разработке новых конструкций ГУ и модернизации действующих ГУ с целью дальнейшего повышения экологичности их работы применяются следующие подходы: интенсификация теплоотвода от зоны горения, сокращение концентрации химических реагентов (N_2 и O_2) в реакционной зоне, снижение максимальной температуры горения. С этой точки зрения представляет практический интерес новое авторское техническое решение по реконструкции действующей горелки типа ГП [8]. Сущность усовершенствования ГУ заключается в расположении мазутной форсунки — в амбразуре горелок, а распылительной ее части — на выходе амбразуры ГУ. Кроме того, в конструкции нового ГУ дополнительно выполнен специальный канал с заслонкой для подачи рециркулирующих дымовых газов через отверстие в амбразуру горелки. При этом существенно снижаются выбросы оксидов азота при совместном и раздельном сжигании мазута и газа в ГУ типа ГП. По данным [8] экологический эффект снижения выбросов NO_x от внедрения новой горелки составляет 15...20 %.

Заключение

Для успешного решения экологических проблем на предприятиях нефтепереработки приоритетными на-

правлениями становятся модернизация и внедрение новых малотоксичных ГУ либо их выбор из числа действующего парка горелок на основании математических моделей, предложенных в данной статье. Исследования показали, что экологически эффективными ГУ являются диффузионные горелки типа ГП, рекомендуемые для широкого применения на отечественных НПЗ.

Список литературы

1. Шарихин В.В., Ентус Н.Р. Трубчатые печи нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: Сенсоры. Модули. Системы. 2006. 392 с.
2. Катин В.Д. Модернизация горелочных устройств нефтезаводских трубчатых печей и охрана окружающей среды. Владивосток: Дальнаука. 2012. 196 с.
3. Жидков А.Б. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. СПб.: Артпроект. 2015. 104 с.
4. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М.: ДеЛи принт. 2008. 296 с.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа. 1998. 479 с.
6. Зельдович Я.Б. Окисление азота при горении. М.: Изд-во АН СССР. 1947. 145 с.
7. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. СПб.: Недра. 1998. 312 с.
8. Пат. № 158820 РФ, МКИ F23D 17/00. Газомазутная горелка /А.Ю. Березуцкий, В.Д. Катин. Опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.



**XI Всероссийская конференция
РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ-2019**
г. Москва, 4-5 июня 2019 г., ГК ИЗМАЙЛОВО

4-5 июня 2019 г. в ГК «ИЗМАЙЛОВО» (г. Москва) состоится XI Всероссийская конференция «РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ-2019», посвященная модернизации оборудования электростанций, ТЭЦ, АЭС, ГРЭС, ТЭС, повышению ресурса и эффективности турбин, котлов и другого энергетического оборудования, автоматизации, надежности, газоочистке, водоподготовке и водоочистке, антикоррозионной защите, восстановлению и усилению зданий и оборудования, экологии и промышленной безопасности энергетики.

Ежегодно в работе конференции принимают участие от 150 до 200 делегатов.

Условия участия, бланки заявок, сборники предыдущих конференций, а также другую информацию - см. на сайте www.intecheco.ru
т.: +7 (905) 567-8767, ф.: +7 (495) 737-7079 admin@intecheco.ru